

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Niko Bolanča

Zagreb, 2008

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Određivanje trajne čvrstoće materijala X21CrMoV12-1 s različito sačmarenom površinom

Voditelj rada:

Prof.dr.sc. Janoš Kodvanj

Student:

Niko Bolanča

Zagreb, 2011

SADRŽAJ

Popis oznaka.....	I
Popis slika.....	II
Popis tablica.....	III
1. Uvod.....	1
2. Zamorna čvrstoća.....	2
2.1 Faktori koji utječu na dinamičku izdržljivost.....	5
3. Sačmarenje.....	8
4. Provedba eksperimenta.....	10
4.1 Način ispitivanja.....	10
4.2 Opterećenje.....	10
4.3 Ispitni uzorci.....	11
4.3.1 Materijal.....	11
4.3.2 Ispitne grupe.....	11
4.4 Ispitivanje prve grupe uzoraka.....	12
4.5 Ispitivanje druge grupe uzoraka.....	14
4.6 Ispitivanje treće grupe uzoraka.....	15
4.7 Ispitivanje četvrte grupe uzoraka.....	17
5. Usporedba rezultata.....	19
5.1 Maksimalni broj ciklusa po ispitnim grupama.....	19
5.2 Prosječni broj ciklusa po grupi.....	19
6. Zaključak.....	20

7. Popis literature.....	22
8. Prilog	23
1. Programski kod za cikličko ispitivanje epruveta	

Izjavljujem da sam radio samostalno koristeći se stečenim znanjem,navedenom literaturom i opremom Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku.

Zahvaljujem mentoru dr.sc. Janošu Kodvanju, na uloženom naporu i podršci.

Također zahvaljujem asistentu Zvonimiru Tomičeviću na ukazanoj pomoći i informacijama.

U Zagrebu, veljača 2011

Popis oznaka

r		- koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja
σ_{\min}	[N/mm ²]	- minimalno naprezanje ciklusa naprezanja
σ_{\max}	[N/mm ²]	- maksimalno naprezanje ciklusa naprezanja
σ_a	[N/mm ²]	- amplitudno naprezanje
σ_g	[N/mm ²]	- gornje naprezanje
R_d	[N/mm ²]	- trajna dinamička čvrstoća
F	[N]	- sila
HV	[N/mm ²], [MPa]	- tvrdoća po Vickersu
N		- broj ciklusa
f	[Hz]	- frekvencija naprezanja
$R_{p0,2}$	[N/mm ²]	-konvencionalna granica razvlačenja
R_m	[N/mm ²]	- vlačna čvrstoća
p	[bar]	- tlak sačmarenja
N_z		- broj ciklusa u zadnjem koraku
N_{sr}		- prosječni broj ciklusa

Popis slika

Slika 2.1 Površina loma.....	2
Slika 2.2 Promjenljiva naprezanja pri cikličkom opterećenju.....	3
Slika 2.3 Wöhlerov dijagram.....	4
Slika 2.4 Raspored naprezanja u štapu s U-utorom.....	5
Slika 2.5 Dijagram naprezanje-istezanje.....	6
Slika 2.6 Utjecaj obrade površine na zamornu čvrstoću.....	6
Slika 3.1 Deformacija površine.....	8
Slika 4.1 Epruveta za ispitivanje zamorne čvrstoće.....	10
Slika 4.2 Broj izdržanih ciklusa prve grupe uzoraka.....	13
Slika 4.3 Epruveta 1 nakon pucanja.....	13
Slika 4.4 Izgled površine poprečnog presjeka	13
Slika 4.5 Broj izdržanih ciklusa druge grupe uzoraka.....	14
Slika 4.6 Epruveta nakon loma.....	15
Slika 4.7 Broj izdržanih ciklusa treće grupe uzoraka.....	16
Slika 4.8 Epruveta iz treće grupe nakon loma.....	16
Slika 4.9 Broj izdržanih ciklusa četvrte grupe uzorak.....	17
Slika 4.10 Epruveta iz četvrte grupe nakon loma.....	19
Slika 5.1 Maksimalni broj izdržanih ciklusa po grupi do loma.....	19
Slika 5.2 Srednje vrijednosti broja ciklusa po ispitnim grupama.....	19

Popis tablica

Tablica 4.1 Parametri ispitivanja.....	10
Tablica 4.2 Karakteristike materijala X21CrMoV12-1.....	11
Tablica 4.3 Rezultati ispitivanja prve grupe uzoraka.....	12
Tablica 4.4 Rezultati ispitivanja druge grupe uzoraka.....	14
Tablica 4.5 Rezultati ispitivanja treće grupe uzoraka.....	15
Tablica 4.6 Rezultati ispitivanja četvrte grupe uzoraka.....	17

1.UVOD

Sačmarenje spada u napredne postupke oblikovanja deformiranjem. Većinom se koristi za čišćenje površina metala, mehaničko čišćenje žica, pripremu površina za bojanje i da bi povećali otpornost na umor kod opruga i zupčanika. Današnji zahtjevi na svojstva materijala su dosta precizni i često su kontradiktorni. Teško je kod materijala ostvariti neka svojstva koja nisu kompatibilna, npr. da materijal bude što tvrđi ali da ima i dostatnu žilavost. Zato trebamo naći kompromis. Da bi se odredila povoljna kombinacija sastava i oblika materijala koja bi zadovoljila zahtjeve, trebamo ispitati različite varijante uzoraka. Ispitni uzorci se razlikuju bilo po sastavu materijala, načinu obrade, promjeru, itd. Te ispitne uzorke ispitujemo različitim metodama. Ako je element konstrukcije dinamički opterećen kao u ovom slučaju, metoda kojom će se ispitati uzorak mora simulirati opterećenja koja se javljaju za vrijeme životnog vijeka tog elementa. U ovom radu potrebno je odrediti trajnu čvrstoću materijala X21CrMoV12-1 pri istosmjernom dinamičkom opterećenju koje iznosi 75% vlačne čvrstoće dobivene statičkim vlačnim pokusom. Cilj je usporediti utjecaj tri različite vrste sačmarenja na trajnu čvrstoću materijala. Dobivene rezultate treba usporediti s rezultatima dobivenim na uzorcima izređenim tokarenjem standardne kvalitete.

2. ZAMORNA ČVRSTOĆA

Strojni dio koji je dulje vremena podvrgnut naprezanjima promjenjivim u vremenu, lomi se pri naprezanjima koja su znatno manja od statičke čvrstoće i granice tečenja. Ovo je posljedica tzv. zamora materijala. Proces zamora uvijek počinje začecem inicijalne pukotine, koja se ne vidi golim okom. Ta pukotina predstavlja mikrokoncentraciju naprezanja. Izvori mikrokoncentracije naprezanja su najčešće na površini napregnutog elementa, i to pri dnu udubina, površinskih neravnina, u okolini oksida koji djeluju kao strano tijelo (uključina), te na mjestima svih ostalih nehomogenosti izazvanih procesom izrade i obradom. Takva koncentracija naprezanja pogoduje klizanju kristala te širenju pukotine. Proces širenja pukotine traje sve dok se ostatak presjeka ne smanji toliko da naprezanja u njemu dostignu vrijednost statičke čvrstoće materijala, pa se on odjednom nasilno prelomi. Nakon loma se mogu vidjeti dvije zone na površini: zona širenja pukotine, koja je glatka, i zona statičkog loma vrlo grube i nepravilne površine, karakteristične za statički lom (slika 2.1).



Slika 2.1 Površina loma

Mjerodavna karakteristika čvrstoće pri promjenjivim naprezanjima strojnih dijelova jest dinamička čvrstoća strojnog dijela, koja se dobiva ispitivanjem na zamor samog strojnog dijela, ili češće, proračunom na temelju ispitivanja zamora epruvete, izrađene od istog materijala kao i strojni dio. Epruvete su izložene periodično promjenjivim opterećenjima određenog intenziteta (slika 2.2) sve do pojave loma. Ispitivanja se provode za određeni koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja

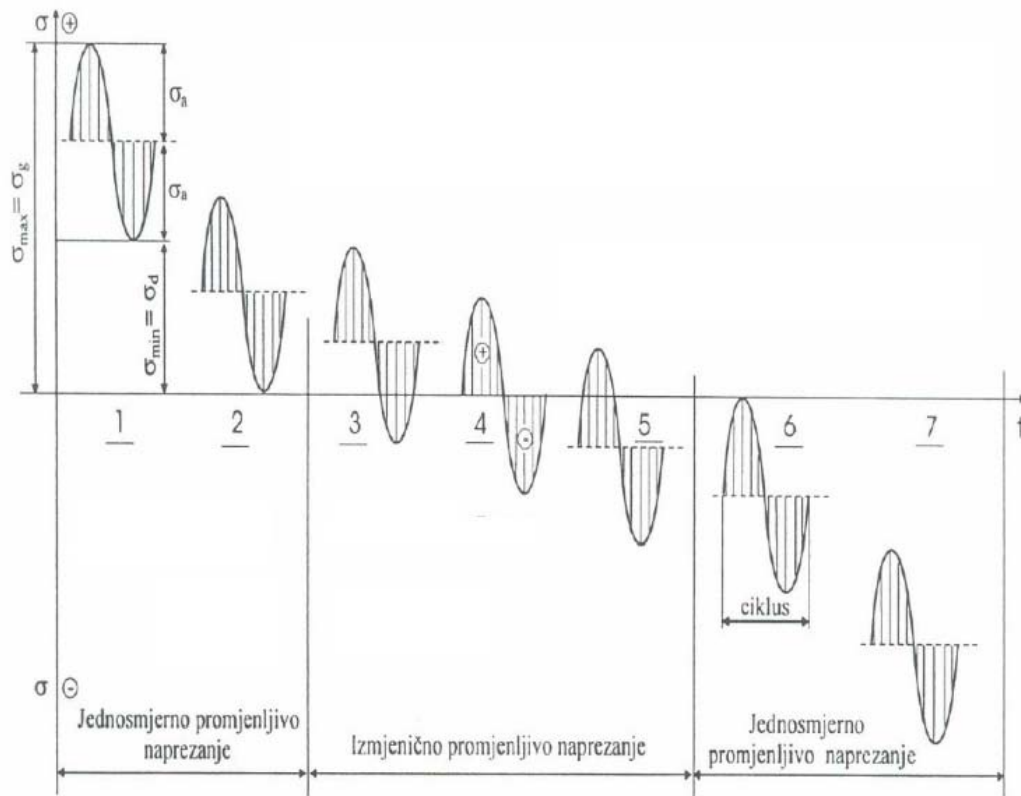
$$r = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (1.1)$$

gdje je:

r - koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja

σ_{\min} - minimalno naprezanje ciklusa naprezanja

σ_{\max} - maksimalno naprezanje ciklusa naprezanja

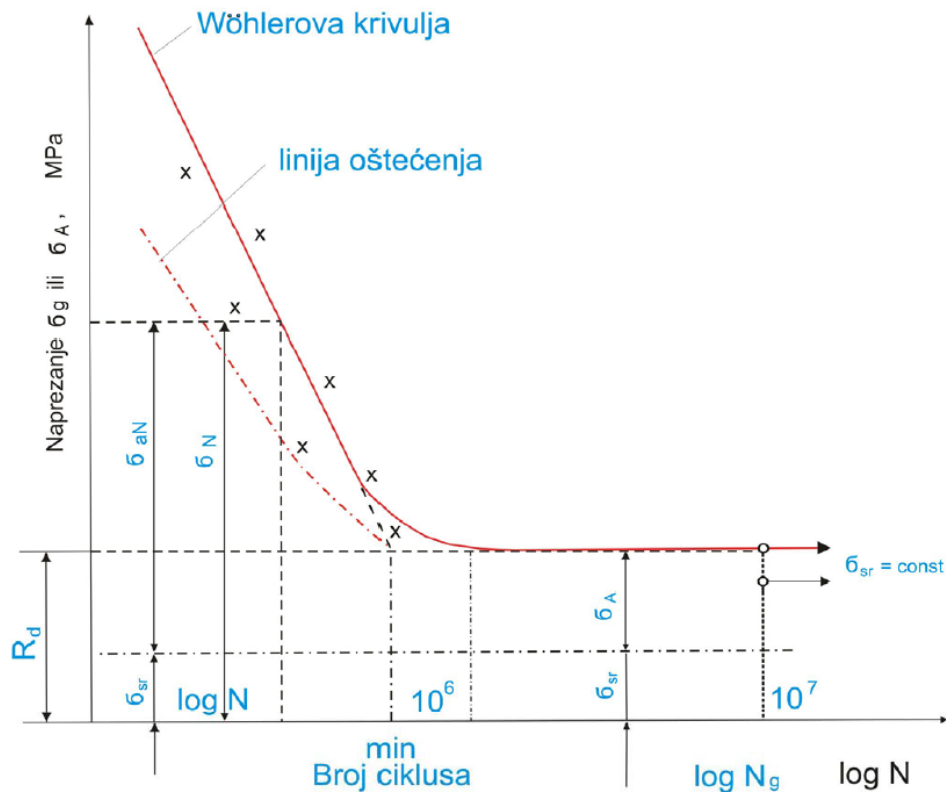


Slika 2.2 Promjenljiva naprezanja pri cikličkom opterećenju

Kao što je vidljivo iz gornje slike, za ispitivanje se najčešće koristi promjenljivo naprezanje sinusoidnog karaktera. Može se govoriti o istosmjernom promjenljivom naprezanju i izmjeničnom promjenljivom naprezanju.

Epruvete se ispituju na uređajima koji omogućuju promjenljivo titrajno opterećenje ispitnog uzorka, a nazivaju se pulzatori ili umaralice. Ukoliko je frekvencija promjene opterećenja manja od 5Hz, radi se o niskofrekventnom ispitivanju. Ispitivanje sa frekvencijom od 5Hz pa do 30Hz je srednje frekventno, a u koliko je frekvencija veća od 30Hz onda je to visokofrekventno

ispitivanje. Da bi se ispitala dinamička izdržljivost, odabere se jedan od tipova promjenljivog napreznja, te se provede Wöhlerov pokus s najmanje pet razina napreznja. Za svaku razinu promjenljivog napreznja, iskazani amplitudom napreznja σ_a ili gornjim napreznjem σ_g , ispituje se 6 do 10 istovrsnih ispitnih uzoraka. Rezultati Wöhlerov pokusa ucrtavaju se u Wöhlerov dijagram, u koji se za pojedine vrijednosti dinamičkog napreznja unose oni brojevi ciklusa koje su ispitni uzorci izdržali do loma (slika 2.3).

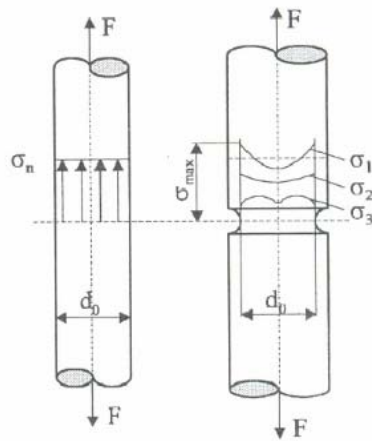


Slika 2.3 Wöhlerov dijagram

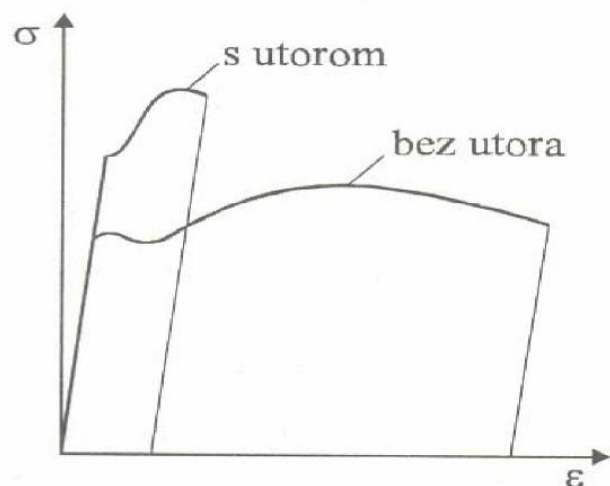
Kao što se vidi Wöhlerova krivulja se asimptotski preblizava pravcu $\sigma=R_d$, pri čemu je R_d trajna dinamička čvrstoća materijala izloženog ciklički promjenljivim napreznjima s koeficijentom asimetrije ciklusa r . Očito, trajna dinamička čvrstoća materijala je ono maksimalno napreznje ciklusa asimetrije r pri kojem epruveta doživi beskonačno mnogo ciklusa, tj. neograničenu trajnost. Wöhlerova krivulja se obično crta u logaritamskim koordinatama.

2.1 Faktori koji utječu na dinamičku izdržljivost

Mnogi faktori utječu na dinamičku izdržljivost a kao prvi može se navesti vrsta cikličkog opterećenja, koje može biti vlačno, tlačno izmjenično, zatim amplituda, te učestalost. Drugi faktor bi bila geometrija djela koje se ispituje, u ovom slučaju epruvete okruglog presjeka. Nagle promjene presjeka i utori mogu dovesti do lokalne koncentracije naprezanja pa dolazi do stvaranja pukotine. U smjeru opterećenja u zarezu nastaju longitudinalna naprezanja σ_1 , okomito na njih cirkularna naprezanja σ_2 , a u smjeru okomito na σ_1 i σ_2 radijalno naprezanje σ_3 . Najveće longitudinalno naprezanje je $\sigma_1 = \sigma_{max}$. Na slici 2.4 prikazana je raspodjela naprezanja u ispitnom uzorku s utorom, a na slici 2.5 utjecaj utora na dijagram naprezanje-istezanje.

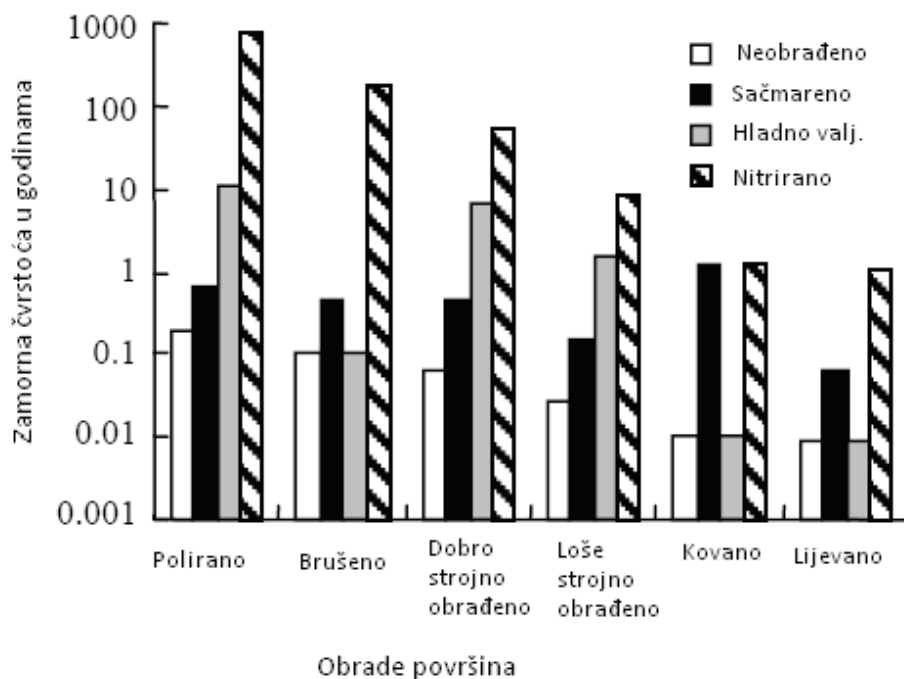


Slika 2.4 Raspored naprezanja u štapu s U-utorom



Slika 2.5 Dijagram naprezanje-istezanje

Kvaliteta površine je zasigurno isto jedan od faktora koji utječe na dinamičku izdržljivost. Hrapavost površine može izazvati mikroskopske koncentracije naprezanja koje smanjuju dinamičku izdržljivost. Iz dijagrama na slici 2.6 vidljiv je utjecaj obrade površine na trajnost materijala. Polirani nitrirani materijali mogu izdržati i do 1000 godina.



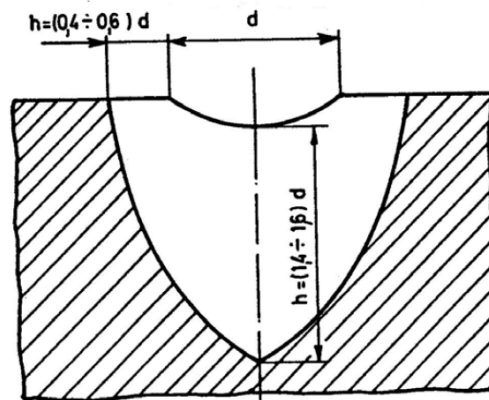
Slika 2.6 Utjecaj obrade površine na zamornu čvrstoću

Zaostala naprezanja su isto jedan od faktora koji utječe na dininamičku izdržljivost. Procesi kao zavarivanje, rezanje i lijevanje mogu uzrokovati zaostala naprezanja u materijalu. Nastaju na mjestima lokalnog unosa topline. Ta naprezanja mogu smanjiti izdržljivost materijala.

Dakako ne treba zaboravit okolišne utjecaje kao što su erozija i korozija koji mogu dosta smanjiti dininamičku izdržljivost. I naravno tu je utjecaj temperature. Veliki ekstremi mogu dosta smanjiti izdržljivost materijala.

3. SAČMARENJE

Obrada sačmarenjem je jedna od načina obrade površine koristeći čeličnu sačmu. Sačma se izbacuje iz mlaznice određenom brzinom da bi na površini materijala koji se obrađuje izazvala plastične deformacije (slika 3.1). Plastična deformacija je u obliku kugle. Tvrdi kugla pod djelovanjem sile F prvo izaziva elastičnu a potom plastičnu deformaciju površine. Ovisno o vrsti čelika koji se obrađuje ovisi i dubina otiska. Kod martenzita je dubina plastično deformirane zone veća nego kod drugih struktura. Sorbit daje najmanju dubinu. Kod sačmarenja dolazi do očvršnuća pa se stupanj očvršćenja izražava omjerom $\Delta HV/HV$ koji se zove relativni prirast tvrdoće.



Slika 3.1 Deformacija površine

Udarno opterećenje površine određeno je energijom udara alata i brzinom deformacije. Energija udara se postiže komprimiranim zrakom, tlakom tekućine ili korištenjem centrifugalne sile. Potrebno je uložiti 30% više energije od one koja je potrebna za plastičnu deformaciju. Zbog elastičnog odraza alata koji nastaje pri udaru o materijal i sile trenja, nastaju gubici. Kod ovakvog načina obrade dolazi do velikog zagrijavanja površine. Temperature mogu narasti do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toliike temperature mogu dovesti do termoplastične deformacije i mogu smanjiti efekt očvršćenja. Kao što je navedeno sačmarenjem se može očvršnuti površinski sloj promjenom njegove fazne strukture. Tu promjenu odražuju razni geometrijski i fizikalno-kemijski parametri. Geometrijski su hrapavost i valovitost, a fizikalno-kemijski struktura, sastav faza, kemijski sastav, deformacija, zaostala naprezanja. U početku deformacijskog procesa dolazi do

usitnjavanja kristalnog zrna na blokove tj. poligonizacija. Daljnjim djelovanjem sile, zbog smicanja po kliznim plohama nastaje značajno usitnjavanje zrna kristala. Pri tom kristaliti gube svoj globoidni oblik, spljoštavaju se i istežu u pravcu deformacije. Stvara se uređena orjentirana struktura vlaknastog karaktera s anizotropnim mehaničkim svojstvima. Plastičnost je duž vlakna viša nego u poprečnom smjeru. Osnovni uzrok očvršćenja je razvoj dislokacija koje se nagomilavaju u blizini linija smicanja, a gibanje im je otežano zaprekama stvorenim u toku deformacije. Deformacijom prezasičenih tvrdih otopina nastupa djelomično njihov raspad, a rezultat je izlučivanje sitnih čestica novih strukturnih tvorbi. Kad se nađu na kliznim plohama, blokiraju smicanje.

4. PROVEDBA EKSPERIMENTA

4.1 Način ispitivanja

Ispitivanja su provedena na četiri grupe epruveta (slika 4.1) gdje je svaka grupa sadržavala 9 uzoraka. Epruvete su ispitivane s početnim naprezanjem od $\sigma_{max} = 750$ MPa i svaki ciklus se povećalo za 50 MPa dok epruveta ne bi pukla. Za testiranje su dobivene kao što je navedeno četiri grupe epruveta koje su se razlikovale po vrsti obrade. Tri grupe su bile sačmarene a jedna grupa samo tokarena.



Slika 4.1 Epruveta za ispitivanje zamorne čvrstoće

4.2 Opterećenje

Parametri ispitivanja kod svih epruveta kao što su maksimalno i minimalno opterećenje, broj ciklusa po koraku N_i i frekvencija f dani su u tablici 4.1

Tablica 4.1 Parametri ispitivanja

Korak	σ_{max} MPa	σ_{min} MPa	N	f Hz
1.	750	37,5	70000	10
2.	800	37,5	20000	10
3.	850	37,5	20000	10
4.	900	37,5	20000	10

Kao što se vidi iz tablice u prvom ciklus je naprezanje iznosilo $\sigma_{max} = 750$ MPa a u svakom sljedećem 50 MPa više. Prije nego što su se epruvete postavile na kidalicu izmjeren im je promjer.

4.3 Ispitni uzorci

4.3.1 Materijal

Materijal iz kojeg su izrađene epruvete je toplinski visokopostojani čelik X21CrMoV12-1.

Karakteristike materijala dane su u tablici 4.2

Tablica 4.2 Karakteristike materijala X21CrMoV12-1

Oznaka čelika prema EN	Sastav materijala [%]				$R_{p0,2}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²
	C	Cr	Mo	V		
X21CrMoV12-1	0,23	12	1,0	0,3	600	800-950

4.3.2 Ispitne grupe

Prva grupa epruveta je:

- pjeskarena,
- sačmarena sa tlakom od $p = 2,5$ bar.

Druga grupa je:

- pjeskarena,
- sačmarena sa tlakom od $p = 2,5$ bar,
- kemijski vibropolirana do hrapavosti površine $R_a 0,4$.

Treća grupa je:

- pjeskarena,
- sačmarena sa max. tlakom $p = \max$ (iznos tlaka nije poznat),
- kemijski vibropolirana do hrapavosti površine od $R_a 0,8$ do $R_a 0,4$.

Četvrta grupa je:

- tokarena

Kao što se može primjetiti postoji razlika između tri grupe koje su sačmarene. Prva je uz pjeskarenje sačmarena s tlakom od 2,5 bar dok su druge dvije grupe uz to još kemijski vibropolirane. Također se može primjetiti da je treća grupa sačmarena sa maksimalnim tlakom dok su prve dvije sačmarene sa 2,5 bar. Četvrta grupa epruveta je samo tokarena što se moglo primjetiti na opip i vizualno jer je površina u usporedbi s prve tri grupe bila dosta gruba i refleksija svjetla tj. odsjaj je bio puno manji.

4.4 Ispitivanje prve grupe uzoraka

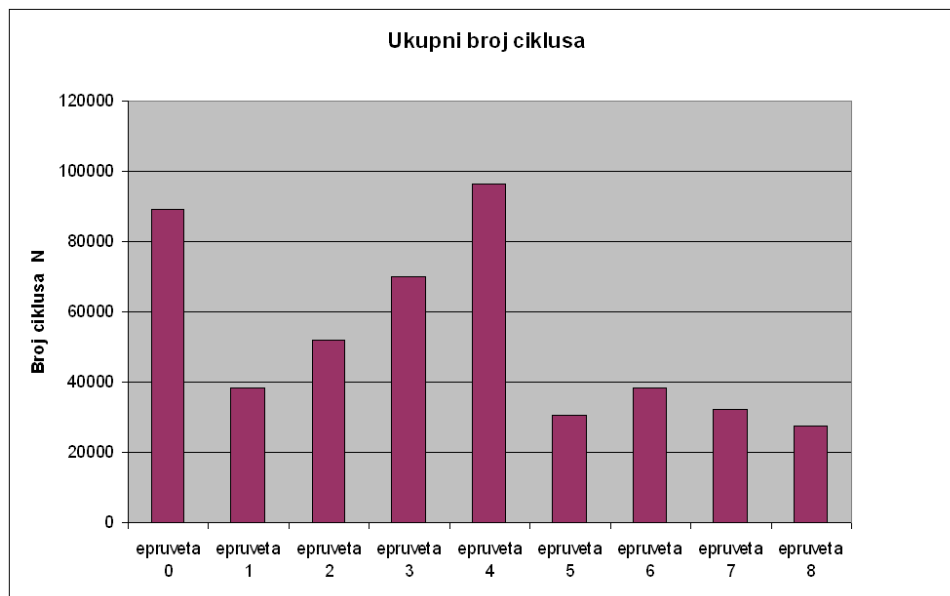
Rezultati ispitivanja prve grupe uzoraka dani su u tablici 4.3.

Tablica 4.3 Rezultati ispitivanja prve grupe uzoraka

Epruveta	Promjer d mm	Br. izdržanih koraka, k	Br. ciklusa N_z u zadnjem koraku	Ukupni br. ciklusa, N
0	5,630	2	19130	89130
1	5,573	1	38355	38355
2	5,575	1	52037	52037
3	5,595	1	68831	69831
4	5,601	3	6365	96365
5	5,565	1	30600	30600
6	5,581	1	38428	38428
7	5,605	1	32181	32181
8	5,601	1	27600	27600

Za dobivanje Wöhlerove krivulje potrebno je ispitati epruvete s različitim naprežanjima sve dok ne puknu. U ovom slučaju nemamo dovoljno podataka da bi nacrtali Wöhlerovu krivulju. Zbog malo vremena kojeg je bilo na raspolaganju, nije bilo moguće ispitati svaku epruvetu sve do

loma i to za više različitih naprezanja. Na slici 4.2 dan je graf koji prikazuje ukupni broj izdržanih ciklusa za različite epruvete.

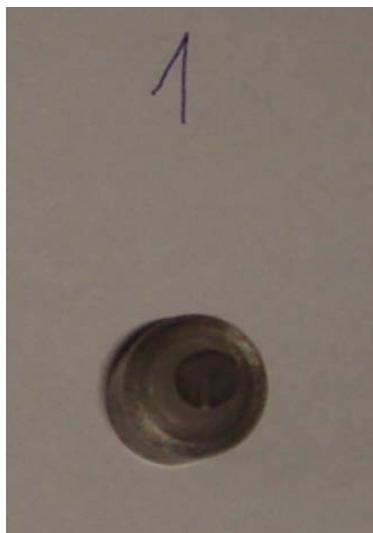


Slika 4.2 Broj izdržanih ciklusa prve grupe uzoraka

Epruvete su pucale na početku suženja, u sredini i između suženja i sredine tako da nije bilo nekog posebnog mjesta gdje su najviše pucale. Na slici 4.3 prikazana je epruveta 1 nakon pucanja, a na slici 4.4 izgled površine poprečnog presjeka.



Slika 4.3 Epruveta 1 nakon pucanja



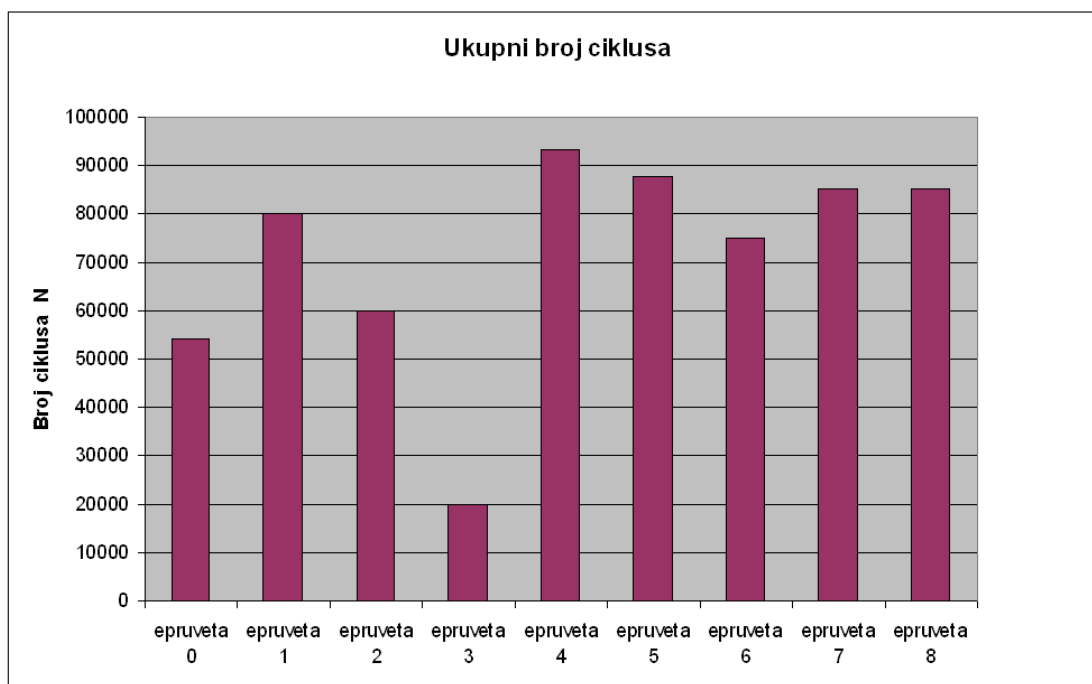
Slika 4.4 Izgled površine poprečnog presjeka

4.5 Ispitivanje druge grupe uzoraka

Rezultati ispitivanja druge grupe uzoraka dani su u tablici 4.4 i dijagramom na slici 4.5.

Tablica 4.4 Rezultati ispitivanja druge grupe uzoraka

Epruveta	Promjer d mm	Br. izdržanih koraka, k	Br. ciklusa N_z u zadnjem koraku	Ukupni br. ciklusa, N
0	5,533	1	54312	54312
1	5,551	2	10259	80259
2	5,558	1	59998	59998
3	5,590	1	20012	20012
4	5,686	3	3235	93235
5	5,570	2	17858	87858
6	5,563	2	4868	74868
7	5,551	2	15235	85235
8	5,548	2	15336	85336



Slika 4.5 Broj izdržanih ciklusa druge grupe uzoraka

Na slici 4.6 prikazana je epruveta nakon loma



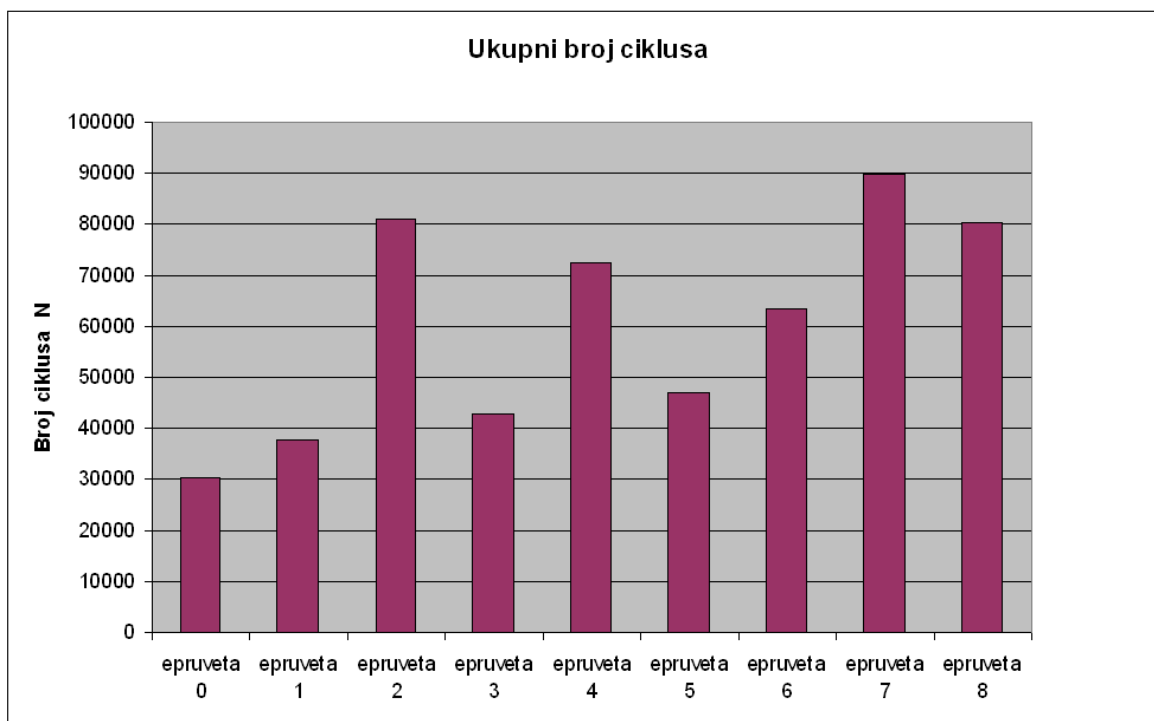
Slika 4.6 Epruveta nakon loma

4.6 Ispitivanje treće grupe uzoraka

Rezultati ispitivanja treće grupe uzoraka dani su u tablici 4.5 i dijagramom na slici 4.7.

Tablica 4.5 Rezultati ispitivanja treće grupe uzoraka

Epruveta	Promjer mm	Br. izdržanih koraka, k	Br. ciklusa N_z u zadnjem koraku	Ukupni br. ciklusa, N
0	5,593	1	30571	30571
1	5,565	1	37673	37673
2	5,550	2	11045	81045
3	5,576	1	43038	43038
4	5,538	2	2565	72565
5	5,540	1	47092	47092
6	5,570	1	63521	63521
7	5,560	2	19858	89858
8	5,541	2	10490	80490



Slika 4.7 Broj izdržanih ciklusa treće grupe uzoraka

Epruveta nakon loma prikazana je na slici 4.8



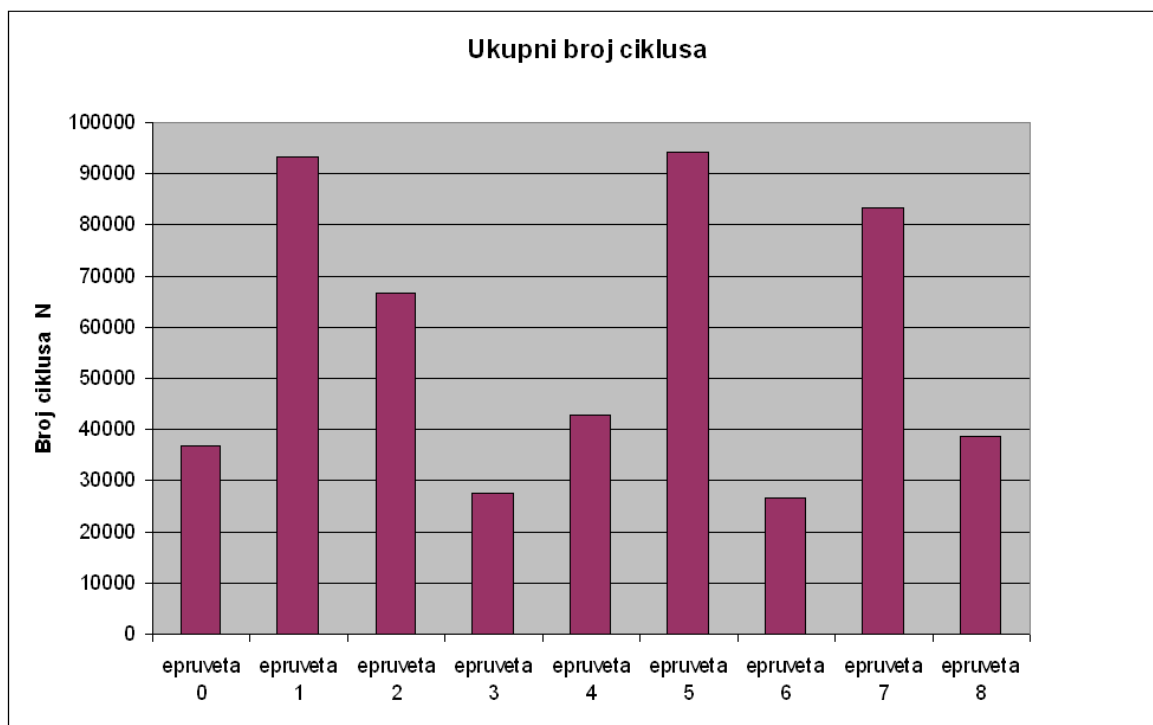
Slika 4.8 Epruveta iz treće grupe nakon loma

4.7 Ispitivanje četvrte grupe uzoraka

Rezultati ispitivanja četvrte grupe uzoraka dani su u tablici 4.6 i dijagramom na slici 4.9

Tablica 4.6 Rezultati ispitivanja četvrte grupe uzoraka

Epruveta	Promjer mm	Br. izdržanih koraka, k	Br. ciklusa N_z u zadnjem koraku	Ukupni br. ciklusa, N
0	5,561	1	36 718	36 718
1	5,603	3	1 159	93 159
2	5,616	1	66 521	66 521
3	5,556	1	27 704	27 704
4	5,588	1	43 032	43 032
5	5,578	3	4 129	94 129
6	5,521	1	26 619	26 619
7	5,593	2	13 242	83 242
8	5,613	1	38 651	38 651



Slika 4.9 Broj izdržanih ciklusa četvrte grupe uzorak

Epruveta nakon loma prikazana je na slici 4.10.

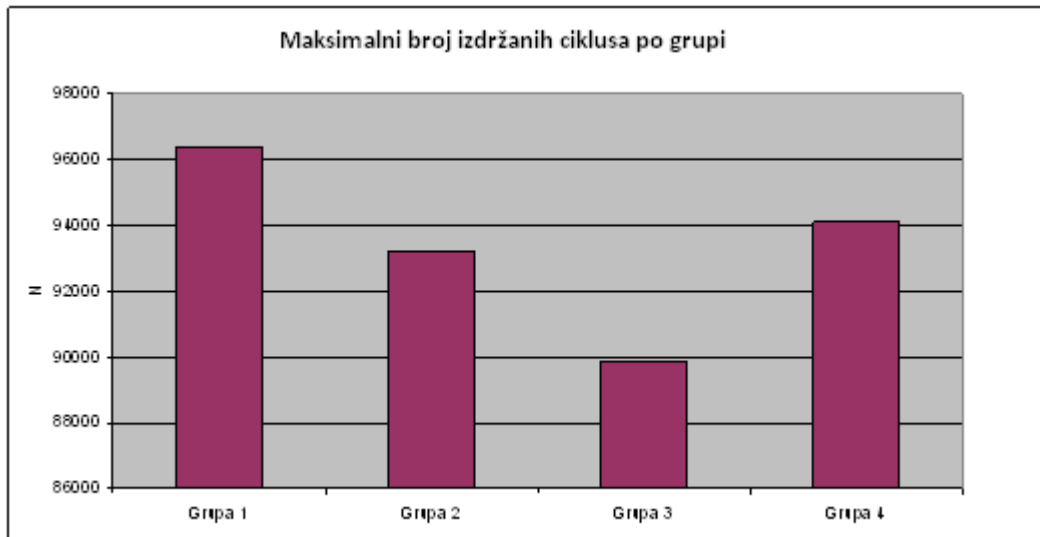


Slika 4.10 Epruveta iz četvrte grupe nakon loma

5.USPOREDBA REZULTATA

5.1 Maksimalni broj ciklusa po ispitnim grupama

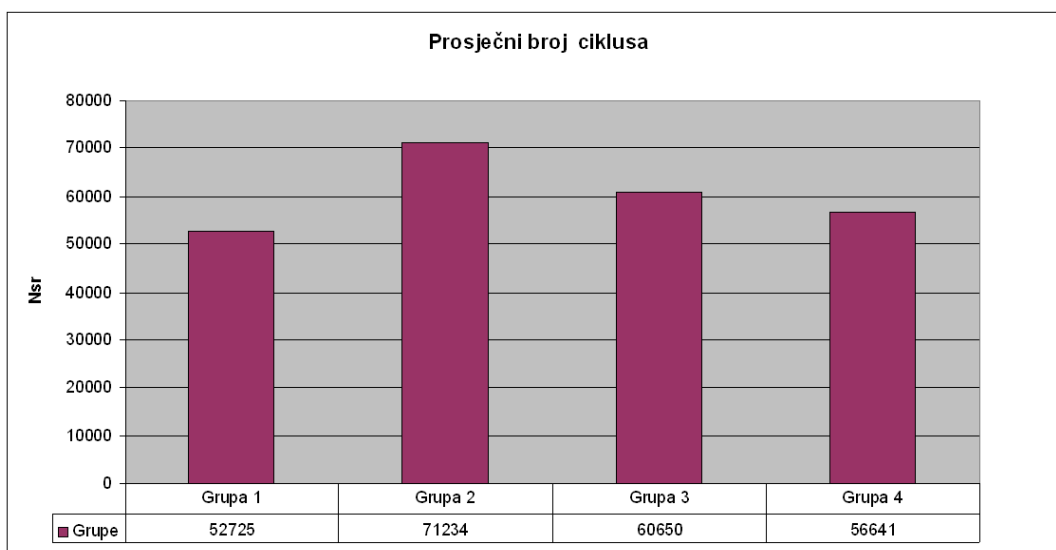
Usporedba maksimalno izdržanog broja ciklusa po ispitnoj grupi dana je dijagramom na slici 5.1.



Slika 5.1 Maksimalni broj izdržanih ciklusa po grupi do loma

5.2 Prosječni broj ciklusa po grupi

Rezultati za srednje vrijednosti broja ciklusa do loma za pojedine ispitne grupe dani su na slici 5.2.



Slika 5.2 Srednje vrijednosti broja ciklusa po ispitnim grupama

6. ZAKLJUČAK

Rezultati ispitivanja su pokazali da bi se na temelju maksimalnog broja ciklusa koji je izdržala jedna od epruveta po pojedinoj ispitnoj grupi, moglo krivo zaključiti o većoj dinamičkoj izdržljivosti pojedine ispitne grupe uzoraka. O dinamičkoj izdržljivosti pojedine grupe uzoraka bi se bolje dalo zaključiti temeljem prosječnog broja izdržanih ciklusa po grupi. Iz rezultata je vidljivo da je druga grupa imala najveći prosječni broj izdržanih ciklusa. Puno je faktora koji utječu na dinamičku izdržljivost i na točnost mjerenja, tako da ne iznenađuje što recimo prva grupa ima epruvetu koja je izdržala najviše ciklusa, a ima najmanji prosječni broj izdržanih ciklusa do loma. U prvoj grupi su samo dvije epruvete prošle prvi korak, dok je kod druge grupe šest epruveta prošlo prvi korak. Treba ponovno podsjetiti da su u prvom koraku epruvete bile opterećene sa naprezanjem od $\sigma_{max} = 750$ MPa a u drugom koraku za 50 MPa više. Kao što je rečeno puno faktora utječe na točnost rezultata pa tako npr. možemo navesti problem da kidalica nije bila u osi i da je nestalo struje pa su se ispitivanja nastavila poslije. Gledajući rezultate i standardne karakteristike ispitanog materijala vidljivo je da epruvete koje su prošle drugi korak i ušle u treći, izdržale u tom zadnjem koraku 850 MPa a vlačna čvrstoća ispitanog materijala je $R_m = 800-950$ MPa, što govori da je materijal u 3. koraku izdržao 89% R_m ako se uzme $R_m = 950$ MPa. Naravno u 3. koraku je broj izdržanih ciklusa bio jako mali, najviše 6365. Gledajući po grupama kao što je rečeno, druga grupa ima najveći prosječni broj izdržanih ciklusa do loma. Druga grupa je kao prva i treća grupa pjeskarena i sačmarena, te vibropolirana kao i treća grupa. Razlika između druge i treće grupe je u hrapavosti površine i tlaku sačmarenja. Druga grupa ima nešto manju hrapavost i sačmarena je sa manjim tlakom nego treća grupa, što bi dalo zaključiti da postoji mogućnost da je tlak sačmarenja prešao neku granicu gdje više ne ide u korist dinamičkoj izdržljivosti. Također se može zaključiti da je manja hrapavost površine povoljnija. Zanimljivo je kako četvrta grupa koja je bila samo tokarena ima veći prosječni broj izdržanih ciklusa do loma nego prva grupa koja je bila pjeskarena i sačmarena, a poznato je da sačmarenje povoljno utječe na dinamičku izdržljivost. To se može pripisati problemima koji su se pojavili kod prvog ispitivanja. Problem sa osi kidalice, koji je bitno mogao utjecati na točnost rezultata. U prvoj grupi se taj problem ponovio čak četiri puta dok se u četvrtoj grupi nije pojavio niti jednom. Na kraju se može samo približno odrediti

dinamičku čvrstoću materijala jer nema dovoljno podataka za točno određivanje tj. dobivanje Wöhlerove krivulje. Za prvu grupu koja je imala prosječni broj izdržanih ciklusa do loma ispod 70000 ciklusa, koliko je broj ciklusa iznosio u prvom koraku i gdje je naprezanje bilo $\sigma_{max} = 750$ MPa, može se zaključiti da će trajna dinamička izdržljivost R_d biti dosta ispod te vrijednosti. Za drugu grupu koja je imala više od 70000 ciklusa može se zaključiti da će R_d biti malo niži od σ_{max} . Za treću i četvrtu grupu se također može reći da će R_d biti dosta ispod σ_{max} kao i kod 1. grupe. Na kraju se može zaključiti da je ispitivanje bilo korisno i da su potvrđene neke teorijske pretpostavke, isto tako pokazalo se da je kombinacija obrade najpovoljnija kod druge grupe, odnosno ako su epruvete pjeskarene, sačmarene sa tlakom od 2,5 bar i kemijski vibropolirane do hrapavosti R_a 0,4.

7. POPIS LITERATURE

[1] T. Filetin, Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

[2] I. Alfirević, Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga, Zagreb, 1995.

[3] Terzić P., Ispitivanje metala, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta, Beograd 1988.

[4] http://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_%28material%29, 25.01.2011

8. Prilog

1. Programski kod kidalice za cikličko ispitivanje